به‌کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی در مدل‌سازی سلول‌های جریان ثانویه در کانال ذوزنقه‌ای★

مهدی اژدری مقدم[۱] مهنا تاج‌نسایی[۲] محمد گیوه‌چی[۳]

چکیده *جریان عبوری از کانال‌ها دارای سه مؤلفه‌ی سرعت، یک مؤلفه در جهت جریان و دو مؤلفه در جهت عرضی کانال است. در اثر ناهمگنی نوسانات سرعت، یک سری گردابه‌های چرخشی در مقطع کانال ایجاد می‌گردند که سلول‌های جریان ثانویه نامیده می‌شوند. این سلول‌ها سبب ایجاد تنش برشی عرضی در جداره‌های کانال می‌شوند و در نتیجه بحث فرسایش و آبشستگی جداره‌های کانال را مطرح می‌کنند. ناهمگنی آشفتگی به‌علت شرایط مرزی بستر، دیواره‌ی جانبی و سطح آزاد، نسبت ابعادی کانال و هندسه‌ی کانال به‌وجود می‌آید. مکانیزم ایجاد جریان‌های ثانویه را می‌توان به‌کمک معادله‌ی چرخش طولی بیان نمود. در این تحقیق با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و نرم‌افزار ANSYS CFX، جریان در کانال‌های ذوزنقه‌ای مدل‌سازی خواهد شد و علاوه بر بررسی عملکرد CFD در مدل‌سازی سلول‌های جریان ثانویه، توزیع سرعت عمق میانگین و تنش برشی مرزی در کانال مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این راستا برای ارزیابی مدل ساخته شده از مدل آزمایشگاهی تومیناگا و همکاران و مدل تحلیلی شینو و نایت بهره گرفته شده‌است. با صحت‌سنجی مدل* عددی ساخته‌شده براساس نتایج آزمایشگاهی توافق خوبی مشاهده گردید. نتایج حاکی از عملکرد به‌تر مدل آشفتگی تنش برشی رینولدز SSG در مدل‌سازی سلول‌های جریان بود. سطح همگرایی 10^{-4} به‌دلیل پایداری نتایج در آن به‌عنوان سطح همگرایی بهینه انتخاب شد.

واژه‌های کلیدی کانال ذوزنقه‌ای، سلول‌های جریان‌ثانویه، دینامیک‌سیالات‌محاسباتی (CFD)، سرعت عمق‌میانگین، توزیع تنش‌برشی-مرزی.

Application of Computational Fluid Dynamics for Modeling of Secondary Flow cells in Trapezoidal Channel

M. Azhdary Moghaddam M.Tajnesaie M.Givehchi

Abstract *Channel flows have three components of velocity, 1component in flow direction and 2components in spanwise of Channel. Because of heterogeneity of velocity undulations, in the channel section the vortices are formed that are nominated “Secondary Current Cells”. These cells cause the lateral shear stress in the channel walls and introduce the erosion and scour of the channel walls. Heterogeneity of the turbulency is caused due to boundary conditions of the bed, side wall and free surface, the aspect ratio and the geometry of the channel. The mechanism of secondary currents can be expressed by longitudinal vorticity equation. In this research, the flow in trapezoidal channels has been modeled using the “Computational Fluid Dynamics” (CFD) with “ANSYS CFX” soft ware, and additional to investigation of sufficiency of CFD in modeling of secondary flow cells, depth averaged velocity and boundary shear stress distributions are perused. For this purpose, the experimental model of Tominaga, and analytical model of Shiono and knight has been used to verify the numerical results. The numerical results are in agreement with the experimental and analytical models*.

Keywords Trapezoidal Channels, Secondary Current Cells, Computational Fluid Dynamics (CFD), Depth Averaged Velocity, Boundary Shear Stress Distribution.

★ تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۸/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۱۱/۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسؤول، دانشیار، دانشگاه سیستان وبلوچستان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران.

(۲) عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیجار، بیجار، ایران.

(۳) استادیار، دانشگاه سیستان وبلوچستان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران.

مقدمه

با توجـه بـه اهمیـت کانـال‌هـا در بحـث انتقـال آب و وابستگی اعتبار سیستم‌های مدیریت آبی به میزان توجه آن‌ها به انتخاب شرایط کانال‌هـای انتقـال آب، بررسـی شرایط جریان در آن‌هـا از اهمیـت ویـژه‌ای برخـوردار است، به‌گونه‌ای که کاهش ظرفیت انتقال آب به کاهش منابع آب قابل دسترس و در نتیجـه افـت قابـل توجـه منابع اقتصادی منجر می‌شود. از مهم‌تـرین موضـوعات بررسی جریان در کانال‌ها، می‌توان بـه اثـر مؤلفـه‌هـای عرضی سرعت روی جریان اشاره نمود، کـه بـارزترین این اثرات ایجاد سلول‌های جریان ثانویه است. در حال حاضر روش‌هایی که برای محاسبه و طراحی کانـال‌هـا وجود دارد اثر جریـان‌هـای ثانویـه و در نتیجـه توزیـع نیروهای هیدرودینامیکی موجود روی پیرامون مرطوب را نادیده می‌گیرند و این مسأله یکی از مهم‌ترین دلایـل تغییـر شـکل مقطـع عبـوری، کـاهش قابلیـت اعتمـاد عمل‌کرد و ظرفیت کانال‌ها است.

در ایــن زمینــه مطالعــات متعــددی بــه‌صــورت آزمایشگاهی و عددی صورت پذیرفته‌است که در ایـن میان به‌صورت نمونه می‌توان به مواردی اشاره نمود، از جمله: بررسی توزیع تنش برشی مرزی در کانـال‌هـای منشوری و داکت‌ها به‌صورت تجربـی توسـط نایـت و دمتریو [۱]، نایت و همکاران [2]، لای و نایت، رودس و نایت [۱] و یانگ و لیم [3]، تومیناگا و همکـاران[4]، جابرزاده و همکـاران [۵]، ابـداع روش شـینو و نایـت SKM (Shiono and Knight Method) برای محاسبه‌ی توزیع‌های جانبی سرعت و تنش برشی عمـق میـانگین برای جریان در کانال‌هـای منشـوری مسـتقیم، کـاربرد روش SKM برای کانال‌های مختلـف توسـط نایـت و همکاران [6]، خداشناس و همکاران [7]. برای جزئیات بیش‌تر از منبع [۱] می‌توان بهره گرفت.

از آن‌جـایی کـه کانـال‌هـای بـا مقطـع ذوزنقـه‌ای معمول‌ترین شـکل مقطـع بـرای انتقـال آب بـه شـمار می‌روند، در این مقاله بـه بررسـی سـلول‌هـای جریـان ثانویه در کانال‌های مستقیم با مقطع ذوزنقه‌ای پرداختـه شده است.

ماننـد سـایر پدیـده‌هـای فیزیکـی، بـرای بررسـی سلول‌های جریان ثانویـه نیـز مـی‌تـوان از هرسـه نـوع دینامیک سـیالات تجربـی، تئـوری و محاسـباتی بهـره جست. اطلاعات دقیق در مـورد یـک فرآینـد فیزیکـی غالباً توسط اندازه‌گیری عملی بـه‌دسـت مـی‌آیـد. یـک پیش‌گویی تئـوری حـداکثر اسـتفاده را از نتـایج مـدل ریاضی خواهد کرد و در مقایسه با آن نتایج تجربـی را مورد استفاده کـم‌تـری قـرار مـی‌دهـد. در ایـن زمینـه فعالیت‌های گسترده‌ای در قالب مطالعات آزمایشـگاهی و بـه‌ویـژه تحلیلـی صـورت گرفتـه اسـت. پیچیـدگی معادلات حاکم بر مسأله، تأثیر متقابل فیزیکی مختلـف، گذرا بودن اغلب مسائل مهندسی، بالا بودن هزینه‌هـای مربوط به تجهیزات آزمایشگاهی و محدودیت اسـتفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیـری در بسـیاری از کاربردهـای عملی، از جمله دلایلی هستند که استفاده از روش‌هـای تحلیلـی و آزمایشـگاهی را در مقایسـه بـا روش‌هـای عددی محدود می‌کند [۸].

در این مقاله به‌کمک دینامیک سـیالات محاسـباتی (CFD) و با استفاده از نـرم‌افـزار محاسـباتی ANSYS CFX نسخه‌ی 12.0 شـکل‌گیـری سـلول‌هـای جریـان ثانویه در کانال‌های ذوزنقه‌ای مورد بررسی قرار گرفتـه و برای ارزیابی مدل ساخته شده در محیط نـرم‌افـزار از مدل آزمایشگاهی تومیناگا و همکاران [4] کمک گرفتـه شده است.

سلول‌های جریان ثانویه

جریان‌های ثانویه جریان‌هایی هسـتند کـه در صـفحه‌ی مقطع جریان و یا حـول محـوری عمـود بـر صـفحه‌ی مقطع جریان به‌وجود می‌آیند. ایـن‌گونـه جریـان‌هـا در انحناها به جریان‌های ثانویه‌ی قوی موسـوم مـی‌باشـند ولی در کانال‌های بدون انحنا در پلان نیز، به‌جهت تأثیر

زبری جدار و نـامنظمی مقطـع، جریـان‌هـای ثانویـه‌ی ضعیف ایجاد می‌گردند [۹].

به طورکلی می‌توان جریانات چرخشی را بـه سـه نوع اصلی چرخش حول محور عمقی، محور عرضی و محور طولی تقسیم‌بندی کرد [۵]. جریـان‌هـای ثانویـه، نتیجه‌ای از ناهمگنی آشفتگی هستند که به‌دلیل شـرایط مـرزی بسـتر، دیـواره‌ی جـانبی و سـطح آزاد، نسـبت ابعادی کانال و هندسه‌ی کانال ایجاد می‌شوند. این نوع جریان‌هـا نسـبت بـه هندسـه‌ی کانـال بسـیار حسـاس هستند. تومیناگا و همکاران، بررسی جریان‌هـای ثانویـه در مهندسی هیدرولیک در جریـان کانـاهـای روبـاز را به‌دلیل اثر این جریان‌هـا روی میـدان جریـان میـانگین اصلی، قانون اصطکاک، تشکیل اشکال سه‌بعـدی بسـتر از قبیل نوارهای شـنی و انتقـال رسـوب سـه‌بعـدی بـا اهمیت می‌دانند [4].

مکانیسم تولید جریان‌های ثانویه

علـت ایجـاد جریـان‌هـای عرضـی در جریـان طـولی یکنواخـت، ناهمسـانی تـنش‌هـای رینولـدز و بـه‌طـور اساسی مؤلفه‌هـای عمـودی آن اسـت. میـدان سـرعت میانگین طولی به‌وسیله‌ی تنش‌های برشی آشفته تشکیل می‌شود، اما جریان‌هـای عرضـی اثـر قابـل ملاحظـه‌ای روی آن دارند [10].

پرانتـل دو مکانیسـم اصـلی بـه‌وجـود آورنـده‌ی جریان‌های چرخشی در جهت جریان را بـه‌شـکل زیـر بیان کرد [۱۱]:

۱- انحراف تنش‌های برشـی اصـلی بـه‌وسـیله‌ی یـک گرادیـان فشـار عرضـی و یـا نیـروی جسـمی (ماننـد کانال‌های منحنی شکل)

۲- ناهمسانی و نوسانات آشفتگی در صفحه‌ی عمود بر محور چرخش.

مکانیسم تولید جریان‌هـای ثانویـه‌ی القـا شـده توسـط آشفتگی در جریان کانـال مسـتقیم، بـه‌کمـک معادلـه‌ی چرخش طولی توضیح داده می‌شود. معادله‌ی چـرخش طولی در جریان آشفته کاملاً توسعه یافته به‌صورت زیر داده می‌شود [4]:

$$V\frac{\partial \xi}{\partial y} + W\frac{\partial \xi}{\partial z} = \frac{\partial^2}{\partial y \partial z}(\overline{v^2} - \overline{w^2}) + \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)\overline{vw} + \vartheta\left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2}\right) \quad (۱)$$

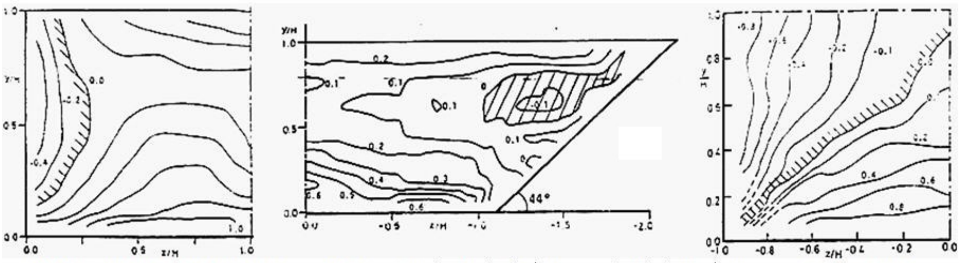
در جایی‌که

$$\xi = \frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z} \quad (۲)$$

کـه در آن W و V بـه‌ترتیـب مؤلفـه‌هـای سـرعت در عرض کانال (z) و عمود بـر بسـتر کانـال (y) و یـا به‌عبارتی مؤلفه‌هـای سـرعت جریـان ثانویـه هسـتند و به‌کمک تابع پتانسیل ψ به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$W = \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad , \quad V = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (۳)$$

کـه در آن ϑ ویسـکوزیته‌ی سـینماتیکی سـیال، $-\overline{vw}$ تـنش برشـی رینولـدز، $\overline{v^2}$ و $\overline{w^2}$ تـنش‌هـای عمودی رینولدز می‌باشـند. توزیـع تفاضـل تـنش‌هـای عمودی ($\overline{v^2} - \overline{w^2}$) نقش اساسی و مهمی را در ساختار جریان‌های ثانویه بازی می‌کند، به گونـه‌ای کـه تفـاوت بین الگوی جریان‌هـای ثانویـه در کانـال‌هـای روبـاز و بسـته بـه کمـک توزیـع تفاضـل تـنش‌هـای عمـودی ($\overline{v^2} - \overline{w^2}$) توضیح داده می‌شود. در شـکل (۱) توزیـع این تفاضل در سه نوع کانال نمـایش داده شـده اسـت. جـرارد نیـز ایـن توزیـع را تعیـین کننـده‌ی سـاختار جریان‌های ثانویه می‌داند [4].



شکل ۱- خطوط بی‌بعد $(\overline{W^2}-\overline{V^2})/U_{\max}^2$ و $(\overline{W^2}-\overline{V^2})/U_{\max}^2$ از راست ۱)کانال بسته ۲) کانال ذوزنقه‌ای ۳)کانال روباز [۵]

اثرات سلول‌های جریان ثانویه روی جریان اصلی

سرعت ماکزیمم در هر مقطع قـائم، در نزدیکـی سـطح آب و در فاصله‌ی ۰.۰۵ تا ۰.۰۲۵ عمق جریان از سطح آزاد اتفاق می‌افتد. علت اصلی این‌که سرعت مـاکزیمم در نزدیکی سطح آزاد پیش می‌آید بیش از آن‌که تحـت تأثیر تنش برشی ناشی از مقاومت هوا باشد، تحت تأثیر جریان‌های ثانویه ضعیف می‌باشد [۹].

جریان‌های عرضی (ثانویه) به‌صورت قابل توجهی فرآیندهای انتقال اختلاط و گرما و جرم را افزایش می-دهنـد، نیروهـای هیـدرودینامیکی را روی پیرامـون مرطـوب کانـال بـازتوزیع مـی‌کننـد، نـواحی بـا کسـر رسوبات ایجاد می‌کنند و به موجـب آن وقـوع انبسـاط محیط با پایداری‌های متفاوت را توسعه می‌دهند [10].

وجود جریان‌های چرخشی در مسیر یک رودخانه موجب ایجاد انواع مختلـف رسـوب‌گـذاری در طـول رودخانه می‌شود [۵]. جریان‌هـای ثانویـه، سـاختارهای سه‌بعدی ایجاد جریان میانگین اصلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [4]. نتایج بررسی‌ها نشان دادند که سـلول‌هـای جریان ثانویـه روی توزیـع تـنش برشـی مـرزی تـأثیر می‌گذارند [12].

دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیـک سـیالات محاسـباتی عبـارت از تحلیـل سیسـتم‌هـای شـامل جریـان سـیال، انتقـال حـرارت و پدیده‌های همراه نظیر واکنش‌هـای شـیمیایی، براسـاس شـبیه‌سـازی کـامپیوتری اسـت [۸ و ۱۳]. پیچیـدگی معادلات حاکم بر مسأله‌ی تأثیر متقابل فیزیکی مختلف، گذرا بودن اغلب مسائل مهندسی، بالا بودن هزینه‌هـای مربوط به تجهیزات آزمایشگاهی و محدودیت اسـتفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیـری در بسـیاری از کاربردهـای عملی، از جمله دلایلی هستند که استفاده از روش‌هـای تحلیلـی و آزمایشـگاهی را در مقایسـه بـا روش‌هـای عددی محدود می‌کند [۸].

در نهایت، یک برنامه‌ی CFD خوب شامل تعـادل بین حل دقیق و پایداری جواب می‌باشد. بررسی اعتبار CFD، نیازمند اطلاعـات بـالا در جزئیـات مربـوط بـه شرایط مرزی مسأله و به‌دست آوردن حجـم بـالایی از نتایج است. برای بررسـی اعتبـار از یـک راه معنـی‌دار، ضروری است که داده‌های تجربی در یک میدان تشـابه به‌دست آیند [۱۳].

مدل‌سازی عددی سلول‌های جریان ثانویه

اندازه‌گیری مستقیم جریـان‌هـای ثانویـه در کانـال‌هـای روباز، با توجه به این نکته که سرعت جریان‌های ثانویه درصد کمی از سرعت طولی جریان است، کار دشواری است [4] و نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی دقیق و دقت بالای کاربر دارد. اگرچه محققان تـلاش‌هـای بسـیاری برای شبیه‌سازی تنش برشی مـرزی بـدون مراجعـه بـه CFD داشته‌اند، آن‌ها خیلی موفق نبوده‌انـد [14]. بـرای

محاسبه‌ی اثر جریان‌های عرضی روی فرآیندهای مختلف، نخست نیاز است که یک مدل ریاضی از میدان سرعت میانگین سه‌بعدی در شکل‌های مختلف مقطع عبوری جریان شامل مرزهای ناهمگن با توانایی مدل‌سازی فرآیندهای جریان در بازه‌ی گسترده‌ای از ناحیه‌ی تغییر محیط‌های کانال ایجاد کنیم. در مرحله‌ی دوم بررسی‌های آزمایشگاهی و تجربی در محل انجام شود مشخصه‌های اصلی توزیع خصوصیات آشفتگی سه‌بعدی معلوم شود و داده‌های تجربی برای مستند ساختن مدل‌های ریاضی ایجاد شده، به دست آید [10].

برای بهره‌گیری از CFD و مدل‌سازی عددی، نیاز به استفاده از نرم‌افزارهایی برای رسم هندسه، شبکه‌بندی، معرفی شرایط جریان، تحلیل جریان و مشاهده‌ی نتایج وجود دارد. برای رسیدن به این اهداف دو نرم‌افزار ICEM CFD و ANSYS CFX انتخاب شده‌اند. در ادامه روند مدل‌سازی به‌ترتیب ارائه می‌شود.

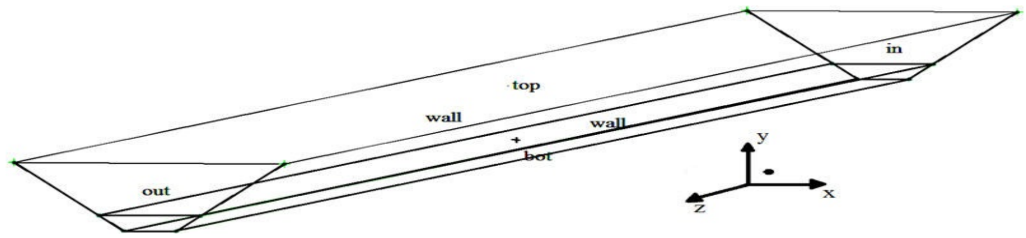
آشنایی کلی با نرم‌افزار ANSYS CFX. نرم‌افزار ANSYS CFX، یک نرم‌افزار با هدف عمومی دینامیک سیالات محاسباتی است که یک حلگر پیشرفته را با قابلیت‌های پیش و پس‌پردازشگر قدرتمند ترکیب کرده‌است و توانایی مدل کردن مواردی از قبیل جریان‌های دائمی و غیردائمی، جریان‌های آرام و آشفته، جریان‌های مادون صوت و در حد صوت و مافوق صوت، نیروی شناوری، جریان‌های غیرنیوتنی، انتقال مؤلفه‌های اسکالر فاقد عکس‌العمل، جریان‌های چندفازی، مسائل احتراق و ... را دارا می‌باشد [12]. در نرم‌افزار ANSYS CFX، چهار سطح همگرایی مقادیر بزرگ‌تر از 10^{-4} (نظیر 10^{-3})، 10^{-4}، 10^{-5} و مقادیر کم‌تر از 10^{-6} تعریف شده است.

در این نرم‌افزار چهارده مدل برای مدل‌سازی آشفتگی وجود دارد شامل مدل $k-\varepsilon$، مدل انتقال تنش برشی (Shear Stress Transport) یا SST ، مدل تنش رینولدز SSG (SSG Reynolds Stress)، مدل $k-\omega$ و ... می‌باشد. نرم‌افزار ANSYS CFX روش عددی حجم محدود را مورد استفاده قرار داده و از الگوریتم Coupled برای گسسته‌سازی معادلات بهره می‌گیرد.

مدل‌سازی هندسی کانال. برای مدل‌سازی هندسه‌ی کانال موردنظر، دو نرم‌افزار Auto Cad و ICEM CFD مورد ارزیابی قرار گرفته و از بین این دو نرم‌افزار گزینه‌ی برتر نرم‌افزار ICEM CFD ، به‌دلیل توانایی آن هم در رسم هندسه و هم در شبکه‌بندی، تشخیص داده شد. رسم هندسه‌ی کانال در این نرم‌افزار در چهار مرحله (مختصات‌دهی نقاط، رسم خطوط، تخصیص سطوح و ایجاد حجم) صورت گرفت. مشخصات کانال مربوط به آزمایش T03 (تومیناگا و همکاران) در جدول (۱) ارائه شده [4] و در شکل (۲) هندسه‌ی کانال ساخته شده در محیط نرم‌افزار ICEM CFD نشان داده شده است. پس از این مرحله حجم ساخته شده به‌کمک همین نرم‌افزار شبکه‌بندی گردید.

جدول ۱ مشخصات هندسه‌ی کانال موردنظر

طول کانال (m)	عرض کف کانال (m)	ارتفاع کانال (m)	زاویه‌ی دیواره جانبی (°)	ارتفاع آب (m)	سرعت جریان ورودی (m/s)
۱۲/۵	۰/۲	۰/۴	۴۴	۰/۰۹۰۵	۰/۳۷۳۳

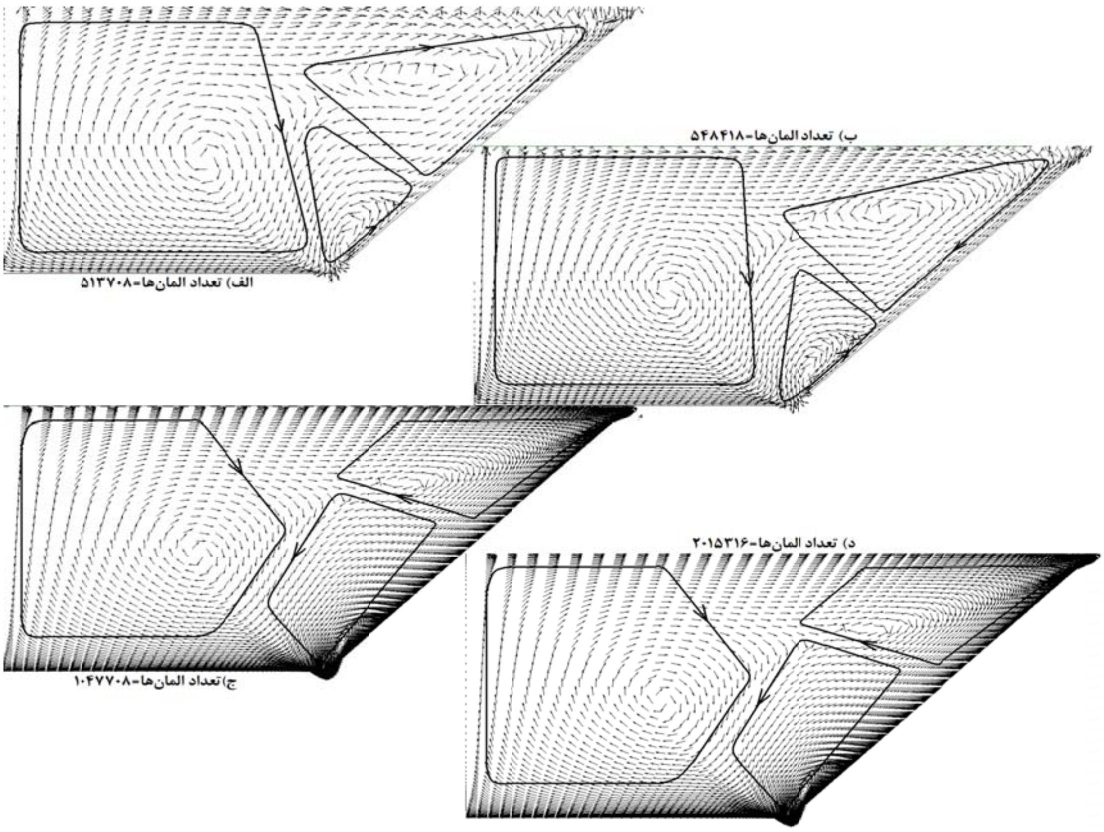


شکل ۲ هندسه‌ی کانال در محیط نرم‌افزار ICEM CFD

مش‌بندی محدوده‌ی جریان. دقت حل مسأله به تعداد سلول‌های موجود در شبکه بستگی دارد و اصولاً شبکه‌های غیریکنواخت، با تعداد سلول‌های مختلف در قسمت‌های مختلف بدنه بسته به موقعیت آن، در حل یک مسأله قابلیت بیش‌تری دارند. البته باید درنظر داشت که ایجاد چنین شبکه‌ای بستگی به عوامل مختلفی از جمله نوع مدل اغتشاشی، شکل ظاهری مدل مانند مقطع عرضی، نوع مسأله‌ی مورد بررسی و مواردی از این قبیل دارد. رفع خطاهای موجود در حل مسأله از طریق تغییر در شبکه و بهینه نمودن آن صورت می‌پذیرد و در اکثر موارد تغییر شبکه شامل ریزتر نمودن آن در قسمت‌های مورد نیاز است تا جایی‌که نتایج حاصل مستقل از ابعاد سلول‌های موجود در شبکه شوند و نتایج کلیدی تغییر نکنند. این امر به کمک سعی و خطا و تکرار حل در دفعات مکرر با شبکه‌بندی‌های متفاوت حاصل می‌شود.

در این مطالعه برای شبکه‌بندی محدوده‌ی جریان نیز از نرم‌افزار ICEM CFD بهره گرفته شده است. این نرم‌افزار قابلیت ایجاد دو نوع شبکه‌ی چهاروجهی (Tetrahedral) و شش‌وجهی (Hexahedral) را دارا است و این امکان را در اختیار کاربر قرار می‌دهد که در قسمت‌های مختلف تعداد گره‌ها و المان‌ها را متناسب با هندسه تنظیم نماید. از آن‌جایی که مسأله‌ی موردنظر به‌شدت نسبت به شبکه‌بندی محدوده‌ی جریان، به‌ویژه قسمت سطح آب و دیواره‌های کانال حساس است و شبکه‌بندی نزدیک سطح آب در نتایج حاصل از تحلیل کاملاً مؤثر می‌باشد، به‌کمک قابلیت این نرم‌افزار در ایجاد این نوع شبکه، هندسه‌ی کانال شبکه‌بندی گردیده است.

در این راستا تعداد گره‌های موجود در جهات و قسمت‌های مختلف کانال متفاوت است و بعد از چندین مرحله حساسیت‌سنجی نتایج نسبت به شبکه‌بندی، شبکه‌ی مناسب انتخاب می‌گردد. این شبکه از نوع شش‌وجهی و در قسمت دیواره‌ها و به‌خصوص سطح آزاد متراکم‌تر است که این مسأله از زیاد بودن تعداد گره‌ها در این نواحی نشأت می‌گیرد. تعداد گره‌ها و المان‌های موجود در کل حجم به‌ترتیب ۱۰۷۹۱۰۰ و ۱۰۴۷۷۰۸ می‌باشد. برخلاف محدوده‌ی عبور جریان آب، شبکه‌بندی در قسمت بالای سطح آب که شامل هوا است درشت‌تر می‌باشد و این مسأله به عدم دخالت آن در نتایج بازمی‌گردد. این عمل از یک طرف می‌تواند موجب پایین آمدن سرعت همگرایی و از طرف دیگر به‌دلیل کاهش تعداد المان‌ها موجب افزایش سرعت حل شود. در شکل (۳) نتایج مربوط به حساسیت‌سنجی مش در شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه ارائه شده‌است.



شکل ۳ حساسیت‌سنجی مش در شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه و انتخاب شبکه‌بندی با تعداد ۱۰٤۷۷۰۸ المان

شرایط مرزی. با توجه به آن‌که تمام سیستم‌های فیزیکی در یک فاصله‌ی معین دارای مرز می‌باشند، در محاسبات باید شرایط مشخصی در حدود یا مرزهای سیستم فیزیکی در نظر گرفته شوند. این شرایط، شرایط مرزی نامیده می‌شوند [۱۵]. اکثر شرایط مرزی در کانال‌های روباز شبیه به شرایط مربوط در مجراهای بسته هستند. تنها شرط مرزی در سطح آزاد بین این دو دسته از جریان‌ها متفاوت است [۱۵].

از دیگر شرایط مرزی، شرایط مرزی مربوط به ورودی و خروجی است. در صورتی‌که جریان فوق بحرانی باشد، به هنگام اعمال شرایط مرزی باید عمق جریان در ورودی و خروجی مشخص باشد. اما اگر جریان زیر بحرانی باشد، باید عمق جریان در خروجی معین و از حل عددی عمق جریان در ورودی محاسبه شود و یا این‌که عمق جریان در ورودی معین و از حل عددی عمق جریان در خروجی محاسبه شود [۱۵].

شرایط اعمالی به جداره‌ها نیز جزو شرایط مرزی محسوب می‌شوند و لازمه‌ی حل معادلات می‌باشند. در زیر به شرایط مرزی اعمال شده برای مدل‌سازی عددی موضوع مورد نظر در نرم‌افزار ANSYS CFX پرداخته خواهد شد.

شرایط مرزی در ورودی کانال (Inlet). با توجه به این‌که جریان در مدل مورد نظر زیربحرانی (Fr=0.46<1) است، لذا توجه به نکات یاد شده در بالا، محاسبه‌ی عمق جریان در ورودی به نرم‌افزار واگذار شده و از شرط مرزی مقدار مشخص برای سرعت (مؤلفه‌ی کارتزین سرعت U=0، V=0 و W=0.3733m/s) در این مقطع استفاده شده است. مقدار سرعت در این مقطع بر اساس محاسبات تجربی انجام شده توسط تومیناگا و همکاران [4]، W = 0.3733 m/sec (سرعت در طول کانال)، در نظر گرفته شده است. این شرط مرزی در جریان‌های

تراکم‌ناپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جریان‌های تراکم‌پذیر استفاده از این شرط مرزی به نتیجه‌های غیرفیزیکی منتهی خواهد شد، زیرا این شرط ورودی اجازه می‌دهد که شرایط سکون به هر اندازه‌ای افزایش یابد [۸].

شرایط مرزی در خروجی کانال (Outlet). در خروجی میدان جریان فرض می‌شود که تغییر کمیت‌ها (از جمله ارتفاع آب) در راستای جریان قابل اغماض است و خطوط جریان به‌صورت مستقیم و موازی یکدیگر هستند. بنابراین در این مقطع برای کلیه‌ی کمیت‌ها در راستای جریان گرادیان صفر در نظر گرفته می‌شود. پس از انتخاب شرط مرزی سرعت در ورودی و با توجه به زیربحرانی بودن جریان، شرط مرزی که برای خروجی کانال در نظر گرفته شد، عمق جریان است که در قالب فشار هیدرواستاتیک (Static Pressure) به این مقطع اعمال گردیده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد عمق آب در کانال برابر مقدار ثابت $y = 0.0905 \quad m$ می‌باشد.

شرط مرزی خروجی فشار احتیاج به‌بیان فشار (نسبی) استاتیک در مرز خروجی دارد. مقادیر فشار استاتیک معلوم، فقط وقتی به‌کار می‌رود که جریان زیرصوت باشد. [۸].

شرایط مرزی جداره‌های کانال (Wall). شرط مرزی دیوار برای محدود کردن نواحی سیال با جامد به‌کار می‌رود. در مسأله‌ی موردنظر، جداره‌ها شامل کف و دو دیواره‌ی کانال می‌باشد. در این جداره‌ها از اصل پذیرش (No Slip Wall)_جدار بهره جسته شده و برای صحت‌سنجی براساس مدل آزمایشگاهی موجود، مسطح (Smooth Wall) در نظر گرفته می‌شوند.

شرایط مرزی سطح آزاد (Opening). جریان با سطح آزاد به یک حالت جریان چندفازی اطلاق می‌شود که فازها به‌کمک یک سطح مشترک مشخص از هم جدا می‌شوند. مثال‌هایی از جریان‌های با سطح آزاد شامل جریان کانال‌های روباز، جریان حول ship hulls، مسائل خاکریزی مخازن و بسیاری از موارد دیگر است. جریان‌های با سطح آزاد با مدل‌های همگن باید در مواردی که امکان‌پذیر است استفاده شوند. جریاهای باسطح آزاد با مدل غیرهمگن می‌توانند برای پذیرفتن جدایش دو فاز جریان استفاده شوند [16].

کاربرد جریان با سطح آزاد در CFX به‌طور اساسی مشابه حالت چندفازی (همگن یا غیرهمگن) با برخی گزینه‌های گسسته‌سازی ویژه برای حفظ تیزی سطح مشترک است. اینها شامل موارد زیر می‌باشند [16]:

۱- یک طرح متفاوت فشرده برای جابه‌جایی افقی کسرهای حجمی در معادلات کسر حجم.

۲- یک طرح انتقال فشرده برای معادلات کسر حجمی (اگر مسأله شامل انتقال است).

۳- رفتار ویژه‌ی ترم‌های گرادیان فشار و جاذبه برای اطمینان از این‌که جریان در سطح مشرک در رفتار خوبی باقی می‌ماند.

در این نرم‌افزار برای سطح آزاد جریان از شرط مرزی Opening استفاده می‌شود. نرم‌افزار ANSYS CFX شرط Opening را به‌دلیل وجود دو فاز آب و هوا و در سطح مشترک این دو نوع سیال در نظر می‌گیرد.

انتخاب مدل آشفتگی

یک مدل آشفتگی عبارتست از یک رویه‌ی محاسباتی برای بستن سیستم معادلات جریان متوسط، به گونه‌ای که کم و بیش بخش وسیعی از مسائل جریان را بتوان حل کرد. برای یک مدل آشفتگی در موارد کلی، برنامه‌ی CFD باید دارای کاربرد وسیع، دقیق، ساده و از نظر اقتصادی قابل اجرا باشد [12]. همان‌طور که اشاره شد، جریان‌های ثانویه به‌دلیل ناهمگنی آشفتگی ایجاد شده و در نهایت القا شده توسط آشفتگی هستند،

بنابراین انتخاب نوع مدل آشفتگی به‌طوری که بتواند در نمایش سلول‌های این جریان‌ها مؤثر باشد از مهم‌ترین مراحل مدل‌سازی عددی جریان‌های ثانویه در کانال‌ها است.

بنابراین پس از بررسی و ارزیابی چندین مدل آشفتگی شامل مدل‌های $k-\varepsilon$، SST، SSG و LRR، مدل SSG برای مدل‌سازی سلول‌های جریان ثانویه به‌تر از سایر مدل‌ها عمل کرد و نتایج آن در صحت‌سنجی (Verify) مدل قابل قبول‌تر از سایر مدل‌ها تشخیص داده شد [۱]. از این‌رو در مدل‌سازی سلول‌های جریان در کانال مورد نظر از این مدل استفاده شده است. در ادامه به بررسی اجمالی این مدل آشفتگی خواهیم پرداخت.

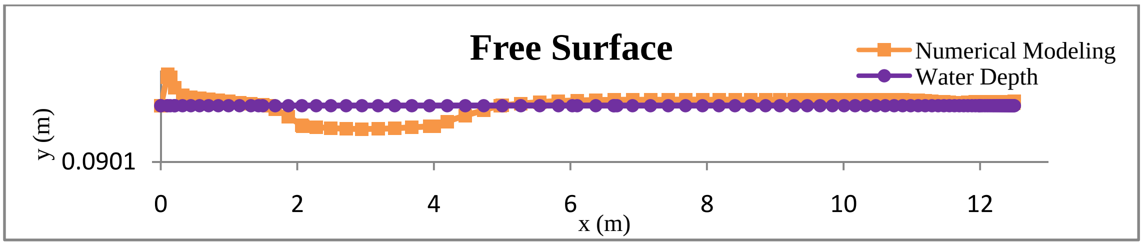
مدل SSG (SSG Reynolds Stress Model)، یکی از زیرمجموعه مدل‌های آشفتگی معادله‌ی تنش‌های رینولدز (Reynolds Stress Models Equation) محسوب می‌شود. دقت این مدل برای جریان‌های پیچیده بسیار بالا است. همگرایی چرخه‌ی بیرونی در این مدل نسبت به مدل k−ε کندتر صورت می‌گیرد و علی‌رغم دقت بالای این مدل، همگرایی در آن بسیار آرام صورت می‌پذیرد [16].

این مدل توسط اسپزیال، سارکار و گاتسکی [17] توسعه یافته‌است و از یک رابطه‌ی درجه دوم برای همبستگی فشار- کرنش، استفاده می‌کند. برخی از نواقص مدل‌های تنش رینولدز برای شبیه‌سازی لایه‌های مرزی، که از معادله‌ی مربوط به ترم ε نشأت می‌گیرد، سبب توسعه‌ی یک مدل تنش رینولدز شده است که در آن به‌جای معادلات مربوط به ترم ε از ترم ω استفاده می‌شود. این مدل، همانند دو مدل دیگر RSM، برپایه‌ی معادلات انتقال برای همه‌ی مؤلفه‌های تانسور تنش رینولدز و نرخ استهلاک قرار دارد. این مدل فرضیه‌ی ویسکوزیته‌ی ادی را استفاده نمی‌کند اما یک معادله برای تنش‌های رینولدز در سیال به‌کار می‌گیرد [16]. مدل SSG به‌شدت نسبت به شرایط شبکه‌بندی در نزدیکی دیواره حساس می‌باشد و برای شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه مدل مناسبی است.

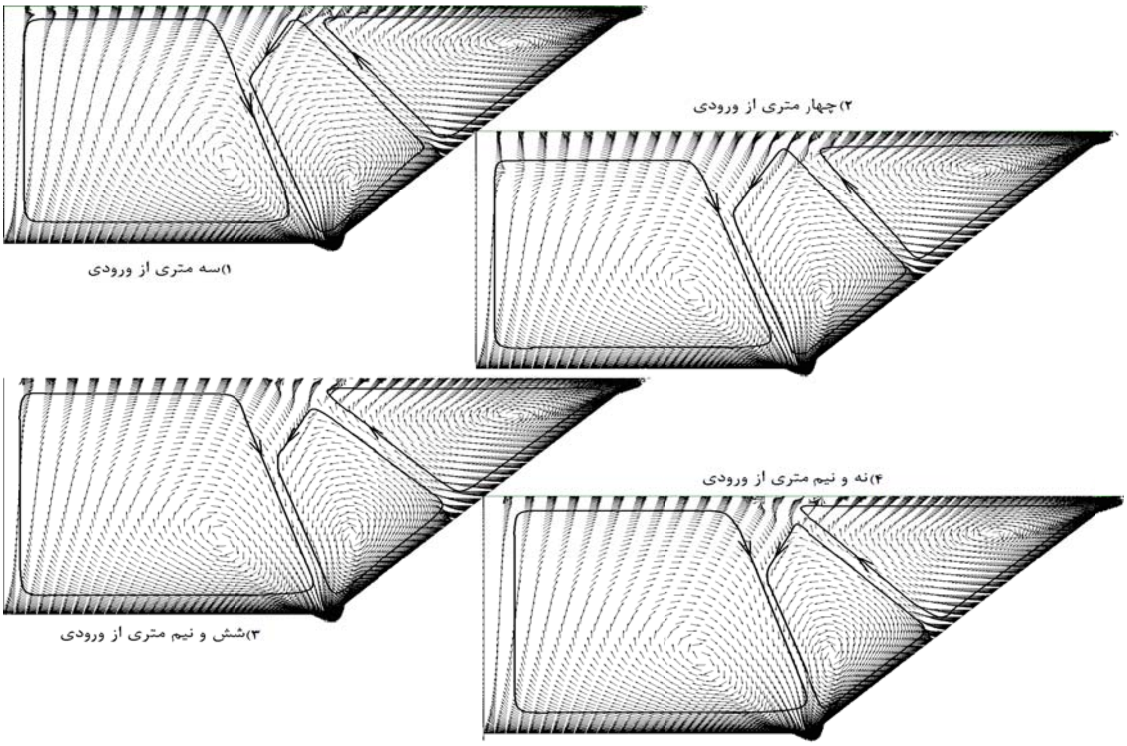
نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی

در ادامه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در محیط نرم‌افزار ارائه گردیده است و همان‌طور که در ابتدا اشاره شد برای ارزیابی مدل ساخته شده از نتایج مدل آزمایشگاهی تومیناگا و همکاران [4] بهره گرفته شده است.

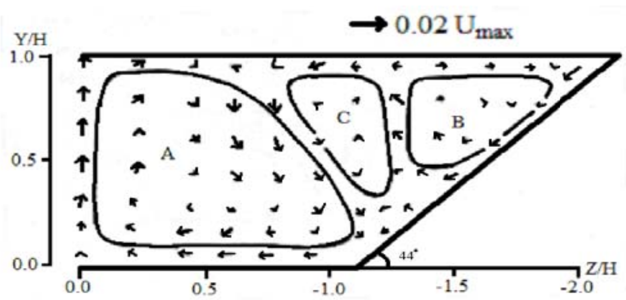
سطح آزاد. شکل (٤) وضعیت سطح آزاد را در قالب نمودار نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، در ابتدای کانال و نزدیک ورودی، سطح آب نسبت به مقدار واقعی آن نوسان دارد و با حرکت در طول کانال و رسیدن به طول توسعه‌یافتگی (تقریبا از فاصله‌ی ٦/٥ متری از ورودی)، سطح آب به مقدار ثابت و صحیح آن نزدیک می‌شود و خطای محاسباتی که در ابتدای کانال وجود داشت، از بین می‌رود. لذا می‌توان الگوریتم به‌کار رفته در نرم‌افزار را برای محاسبه‌ی سطح آب مناسب دانست و به آن استناد نمود.



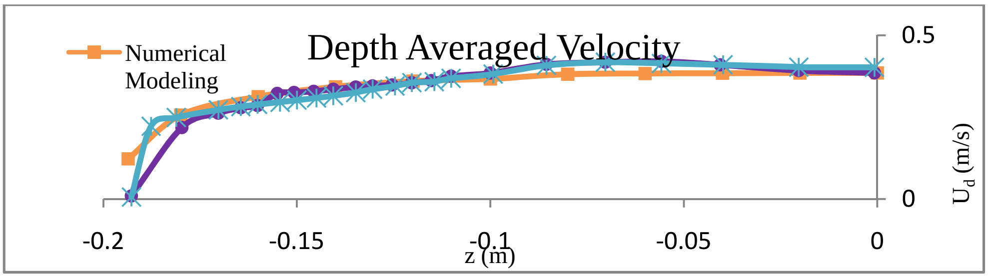
شکل ٤ نمودار سطح آزاد آب در کانال



شکل ٥ روند شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه در مدل عددی به‌ترتیب در فاصله‌ی ۱) سه، ۲) چهار، ۳) شش و نیم و ٤) نه و نیم متری از ورودی کانال



شکل ٦ سلول‌های جریان ثانویه در آزمایش تومیناگا و همکاران[4]

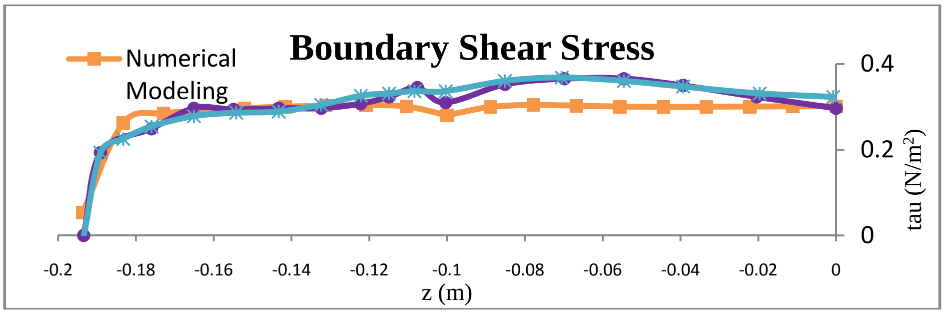


شکل ۷ مقایسه‌ی سرعت عمق میانگین بین نتایج مدل‌سازی عددی، آزمایشگاهی و تحلیلی

سلول‌های جریان ثانویه. شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه تقریباً از فاصله‌ی ۳ متری از ورودی کانال روبه تکامل می‌نهند و در فاصله‌ی ٤ متری از ورودی کانال شکل واضحی از این سلول‌ها مشاهده می‌شود شکل (٥). تا فاصله‌ی حدود ٦/٥ متری از ورودی شکل این سلول‌ها متغیر است و ابعاد آن‌ها تغییر می‌کند و تقریباً از این فاصله به بعد شکل سلول‌ها ثابت می‌شود و مانند آنچه که در شکل (٥) نشان داده شده‌است، دیده می‌شوند. این مسأله را نیز می‌توان به توسعه‌یافتگی جریان پس از طی فاصله‌ی ٦/٥ متر از ورودی مربوط دانست که مطابق با نتایج آزمایش‌های تومیناگا و همکاران است (آن‌ها طول لازم برای توسعه‌یافتگی جریان را ٦/٥ متر دانستند). شکل (٦) نتایج کار آن‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این دو شکل دیده می‌شود، نحوه‌ی شکل‌گیری، جهت چرخش، اندازه و ابعاد، محل قرارگیری سلول‌ها و در نهایت حرکت به سمت گوشه‌ی آن‌ها مشابه یکدیگر است و مؤید صحیح بودن نتایج حاصل از این بررسی عددی است. ابعاد مربوط به دو سلول نزدیک دیواره‌ی مایل و محل قرارگیری آن‌ها در فاصله‌ی ٦/٥ متری از ورودی کانال کاملاً بر نتایج آزمایشگاهی منطبق می‌شود و این مسأله را نیز می‌توان دلیلی بر صحت عملکرد الگوریتم به‌کار رفته در مدل‌سازی سلول‌ها دانست.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، حرکت سلول‌های جریان‌های ثانویه در کانال‌های ذوزنقه‌ای به‌سمت گوشه‌ها قابل توجه است و در نتایج مدل‌سازی عددی نیز، همان‌طور که در شکل (٥) نشان داده شده‌است، این پدیده کاملاً مشهود است. اما حرکت روبه گوشه‌ی این سلول‌ها در مدل عددی بیش‌تر از مدل آزمایشگاهی است. این موضوع را از یک طرف می‌توان به کم بودن تعداد نقاط در اندازه‌گیری آزمایشگاهی مربوط دانست (۱۰۰ نقطه‌ی اندازه‌گیری در نصف مقطع) و از طرفی به نقص نرم‌افزار و الگوریتم به‌کار رفته در آن برای محاسبه‌ی سلول‌های جریان، مربوط دانست. اگرچه، بحث درباره‌ی توانایی و عدم توانایی نرم‌افزار نیاز به تسلط کامل بر آن دارد، زیرا به‌عنوان مثال مدل اغتشاشی مورد استفاده ضرایبی دارد که هر یک از این ضرایب به نوبه‌ی خود تأثیر ویژه‌ای روی شرایط جریان دارند و کار روی این موارد خود بحث دیگری را می‌طلبد.

سرعت متوسط‌گیری‌شده‌ی عمقی. برای صحت‌سنجی نتایج عددی مربوط به سرعت عمق متوسط از نتایج کار آزمایشگاهی تومیناگا و همکاران و هم‌چنین نتایج کار تحلیلی شینو و نایت (SKM) [6] استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، نمودار سرعت عمق میانگین محاسبه شده براساس سرعت‌های عمقی به‌دست آمده به‌کمک نرم‌افزار تطابق بسیار خوبی با نتایج کار آن‌ها داشته و فقط در نزدیکی گوشه‌ی کانال ($-0.1 < z < -0.05$) مقداری خطا در حدود ٥٪ وارد محاسبات شده است. به‌نظر می‌رسد این مقدار خطا مربوط به حرکت سلول‌های جریان ثانویه به سمت گوشه‌ها می‌باشد که در مدل‌سازی عددی حرکت سلول‌ها به سمت گوشه بیش‌تر از مدل تجربی آن است.



شکل ۸ مقایسه‌ی تنش برشی کف کانال بین نتایج مدل‌سازی عددی، آزمایشگاهی و تحلیلی

تنش برشی مرزی. تنش برشی یکی از مسائل اساسی در بررسی اثرات جریان روی جداره‌های کانال است و به دلیل مشکلاتی که در پی دارد، از جمله مسائلی است که بسیار مورد توجه قرار دارد. از این‌رو، در این مقاله یکی دیگر از مواردی که کارایی دینامیک سیالات محاسباتی و مدل‌سازی عددی به‌کمک آن مورد ارزیابی واقع شده است، تنش برشی است.

برای ارزیابی در این زمینه نیز از همان دو مدل آزمایشگاهی و تحلیلی استفاده شده است. در ادامه مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی شینو و نایت [6] صورت گرفته و نتایج حاصل از مقایسه در شکل (۸) نشان داده شده است. مقایسه‌ی صورت گرفته در این شکل، حاکی از انطباق نسبتاً خوب نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی و تحلیلی در ناحیه‌ی کف و انطباق بسیار خوب این نتایج در ناحیه‌ی دیواره‌ی کانال می‌باشد. البته بیش‌ترین اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مربوط به نواحی نزدیک گوشه‌ی کانال با حداکثر خطایی در حدود ۱۱٪ بوده‌است و این اختلاف نیز به همان عوامل توضیح داده شده در بخش قبل مربوط می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در حالت کلی نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی سلول‌های جریان در کانال را به‌صورت زیر می‌توان ارائه نمود:

روش عددی و الگوریتم مورد استفاده برای مدل‌سازی سلول‌های جریان ثانویه در این نرم‌افزار مناسب بوده‌است و تطابق بسیار خوبی بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در نمایش سلول‌های جریان وجود دارد. لذا درکل می‌توان دینامیک سیالات محاسباتی را توانمند در مدل‌سازی این سلول‌ها دانست.

۱- مواردی از قبیل تعداد المان‌ها، نوع مدل اغتشاشی، شرایط مرزی و ... در مدل‌سازی سلول‌های جریان بسیار مؤثر است.

۲- مدل اغتشاشی به‌کار گرفته شده (تنش رینولدز SSG) برای این مدل‌سازی مناسب می‌باشد.

۳- نمودار سرعت عمق متوسط تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی دارد.

٤- مقایسه‌ی نتایج حاصل از محاسبه‌ی عددی تنش برشی مرزی با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی حاکی از انطباق خوب نتایج به‌ویژه در ناحیه‌ی دیواره‌ی جانبی است.

مراجع

۱. تاج‌نسایی، مهنا، «بررسی عددی سلول‌های جریان ثانویه، توزیع سرعت و تنش برشی در جریان کانال‌های ذوزنقه‌ای»، پایان-نامه‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران–سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، (۱۳۸۹).

2. Knight. D. W., Yuen. K. W. H., Al-Hamid. A. A. I., Boundary shear stress distributions in open channel flow, In: K.Beven, P.Chatwin, j.Maillbank (eds), Physical Mechanisms of Mixing and Transport in the Environment, Wiley, New York, pp. 51-87, (1994).

3. Yang. S. Q., Lim. S. Y., Boundary Shear Stress Distribution in Trapezoidal Channels, *Journal of Hydraulic Researcher*, Vol. 43, NO1, pp 98-102, (2005).

4. Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K. and Nakagava, H., "Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 27, Issue 1, pp. 149-173, (1989).

۵. جابرزاده، مجید، عطاری، جلال، مجدزاده، محمدرضا، ابوالقاسمی، منصور، «مطالعه‌ی آزمایشگاهی جریانات چرخشی افقی و نقش آن در محل تشکیل نهشته‌ی رسوبی در قوس»، چهارمین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، (اردیبهشت ۱۳۸۷).

6. Knight, D. W., Omran, M. and Tang, X., Modeling Depth-Averaged Velocity and Boundary shear in Trapezoidal Channels with Secondary Flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 1, ©ASCE, (2007).

7. Khodashenas, S.R., Abderrezzak. K.E., Paquier, K., A Boundary shear stress in open channel flow: A comparison among six methods, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46, Issue 5, pp. 598-609, (2008).

۸. سلطانی، مجید، رحیمی اصل، روح ا..، دینامیک سیالات محاسباتی به کمک نرم‌افزار FLUENT، نشر طراح، چاپ چهارم، تهران، (۱۳۸٦).

۹. حسینی، محمود، ابریشمی، جلیل، هیدرولیک کانال‌های باز، دانشگاه امام رضا(ع)، مشهد، چاپ نهم، تهران، ایران، ص ۳٦، (۱۳۸۱).

10. Shnipov, F. D., Three-dimensional kinematic structure of a flow in trapezoidal channels, Translated from Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stov, No.9, pp. 48-52, September, (1989).

۱۱. یعقوبی، مهدی، فغفور مغربی، محمود، گیوه‌چی، محمد.، اثر جریان‌های ثانویه در تخمین سرعت متوسط عمقی در کانال‌های مستطیلی با زبری نواری، کنفرانس مدیریت منابع آب دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران، (۱۳۸٦).

12. Imamoto, H., And Ishigaki, T., Experimental Study on Turbulence Structure in Trapezoidal channel, PP 517-522, (1989).

۱۳. ورستیگ، هنگ کارل.، مالالاسکرا، ویراتونگ، «مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی»، ترجمه‌ی شجاعی‌فرد، محمدحسن، نورپورهشترودی، علیرضا، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، چاپ دوم، تهران، (۱۳۸٦).

14. Knight, D. W., Omran, M. and Tang, X., Modeling Depth-Averaged Velocity and Boundary shear in Trapezoidal Channels with Secondary Flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 1, ©ASCE, (2007).

۱۵. گودرزی، محسن و عظیمیان، احمدرضا، «مدل‌سازی عددی جریان در کانال روباز به‌روش ردیابی سطح آزاد»، مجله‌ی دانشکده فنی دانشگاه تبریز، ص۴۵–۵۷، (۱۳۹۱).

16. ANSYS CFX user manual. v12.0, ANSYS, Inc. ANSYS Europe. Ltd, (2009).

17. Speziale, C.G., Sarkar, S. and Gatski, T.B., Modeling the pressure-strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach, *J. Fluid Mechanics*, Vol. 277, pp. 245-272, (1991).